RESTITUTION DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX AU SOL PAR L'INTERMÉDIAIRE DE LA LITIÈRE ET DES PRÉCIPITATIONS DANS QUATRE PEUPLEMENTS FORESTIERS DE L'EST DE LA FRANCE

G. AUSSENAC *, M. BONNEAU **, F. LE TACON **

avec la collaboration technique de Maryse BITSCH, Mme Renée CLAUDE, J. M. DESJEUNES, Françoise GEORGES et Danielle SALMON

RÉSUMÉ

Les variations mensuelles de la composition minérale des débris végétaux ont été étudiés pour trois peuplements de résineux (*Picea abies* L., *Pinus sylvestris* L., *Abies grandis* (Dougl.) Lindl.) et un peuplement feuillu mélangé (*Fagus silvatica* L. et *Carpinus betulus* L.). Ces débris, surtout constitués d'aiguilles et de feuilles, sont plus pauvres en azote, phosphore, potassium et plus riches en calcium, manganèse et cuivre que les feuilles fonctionnelles. Leur composition présente des variations annuelles importantes : N, P, K présentent un minimum en automne et un maximum au printemps. Ca, Mn et B ont un comportement exactement inverse.

La quantité annuelle d'éléments retournant au sol par l'intermédiaire de la litière a été évaluée dans ces quatre peuplements (tableau 7).

Dans le peuplement d'Epicéa, un bilan plus complet a été dressé en tenant compte des éléments arrivant au sol par l'intermédiaire des eaux qui traversent la masse foliaire où s'écoulent le long des troncs, ainsi que l'apport direct par les eaux de pluie (tableau 8).

Seul le potassium retourne au sol en quantité importante par l'intermédiaire des eaux d'égouttement. Les autres éléments retournent au sol presqu'exclusivement par l'intermédiaire des débris végétaux.

SUMMARY

Variations of the mineral composition of the litter were monthly studied, during two years, in three coniferous stands (*Picea abies, Pinus sylvestris, Abies grandis*) and one mixed broadleavedstand (*Fagus silvatica* and *Carpinus betulus*).

* Station de Sylviculture et de Production, Nancy.
** Station de Recherches sur les Sols forestiers et la Fertilisation, Nancy.

ŒCOL. PLANT.
GAUTHIER-VILLARS
7, p. 1-21, 1972.

The litter is poorer in N, P, K and richer in Ca, Mn, Cu than the living leaves or needles. The lowest content in N, P, K takes place in autumn, the highest in spring, while the highest content in Ca, Mn and B takes place in autumn.

Total fall of nutrients were estimated in the four stands. In the spruce-stand a more complete calculation was made, including elements of the incident rainfall, stem flow and through fall. Only the potassium returns in great quantity to the soil in the leachates.

ZUSAMMENFASSUNG

In drei Nadelholzbeständen (*Picea abies* L., *Pinus sylvestris* L., *Abies grandis*) und einem Laubmischbestand (*Fagus silvatica* und *Carpinus betulus*) wurden während zweier Jahre die monatlichen Veränderungen der Mineralstoffzusammensetzung des Streufalls untersucht. Der vorwiegend aus Nadeln und Blättern zusammengesetzte Streufall ist reicher an Kalzium, Mangan und Kupfer und ärmer an Stickstoff, Phosphor und Kalium als die assimilierenden Blätter und Nadeln. Die monatlichen Veränderungen der Mineralstoffzusammensetzung sind sehr beachtlich. Stickstoff, Phosphor und Kalium haben ein Minimum im Herbst und ein Maximum im Frühjahr, während Kalzium, Mangan und Bor ein genau umgekehrtes Verhalten aufweisen. Bei den untersuchten Nadelholzarten vollzieht sich eine Umlagerung der Mineralnährstoffe zwischen den verschiedenen Nadeljahrgängen auch noch kurz vor dem Abfall.

In den vier Beständen werden auch die jährlich durch den Streufall dem Boden zugeführten Mengen an Mineralnährstoffen berechnet.

Für den Fichtenbestand wurde versucht eine etwas erweiterte Bilanz aufzustellen, wobei die durch den durchfallenden Niederschlag und den Stammfluss auf den Boden gelangenden Mineralelemente mitberücksichtigt wurden. Gleichzeitig wurde auch versucht die Anlieferung an Mineralelementen durch das Freiland-Niederschlagswasser abzuschätzen. Es zeigte sich, dass nur das Kalium in bedeutenten Mengen durch Auswaschung und Stammabfluss in den Boden zurückgeführt wird, während die übrigen Elemente nahezu ausschliesslich über den Streufall in den Boden gelangen.

INTRODUCTION

Les éléments minéraux suivent dans tout écosystème sol-végétal-atmosphère des cycles extrêmement complexes que nous rappellerons brièvement.

A la mort des végétaux ou de certaines parties de ces végétaux, les éléments prélevés retournent au sol par minéralisation plus ou moins rapide suivant les conditions de milieu. Ils deviennent à nouveau disponibles pour l'alimentation à moins qu'ils ne disparaissent définitivement par lessivage ou soient immobilisés par rétrogradation.

En fait, une partie des éléments minéraux absorbés par le végétal peut revenir directement au sol par l'intermédiaire des eaux de pluie. Dans les écosystèmes forestiers en particulier, les précipitations avant d'arriver au sol traversent une quantité importante de masse foliaire et se chargent ainsi, au contact des feuilles ou des branches ou des troncs, en éléments minéraux ou organiques (DOMMERGUES, CARLISLE et *al.*, MARUYAMA, MINA, DIETRICH, etc.). Ces éléments minéraux peu-

vent être immédiatement réabsorbés par le végétal, ce qui complique singulièrement les problèmes de bilan.

En outre, les eaux de pluie, avant d'arriver au sol et au contact des végétaux, contiennent en dehors de l'azote ammoniacal ou nitrique, des quantités non négligeables d'éléments minéraux provenant de poussières en suspension dans l'air ou des résidus de l'activité industrielle ou de l'activité humaine en général.

D'autre part, lorsque nous sommes en présence d'un système productif, les éléments minéraux contenus dans les récoltes disparaissent du cycle.

Il est intéressant à plus d'un titre de connaître la quantité d'éléments nécessaires à un peuplement par hectare et par an à différents stades de sa vie, dans différentes conditions de milieu et, pour différentes essences, de connaître les quantités retournant annuellement au sol et les quantités exportées définitivement.

Il est bien difficile de connaître ces différentes valeurs en raison de la difficultés d'évaluer la biomasse d'un peuplement et de la complexité des cycles minéraux, complexité d'autant plus grande que chez les espèces pérennes comme les arbres, il se produit des transferts d'éléments entre les parties anciennes et les parties nouvellement synthétisées. Par exemple, dans les aiguilles des résineux, la plupart des éléments diminuent au fur et à mesure de leur vieillissement et servent à la synthèse des nouvelles aiguilles.

Diverses études ont été effectuées ces dernières années dans différents pays :

Aux Etats-Unis par exemple, YOUNG, CARPENTER et ALTENBERG ont construit des tables provisoires donnant la teneur totale en éléments minéraux y compris les oligo-éléments des différentes parties de l'arbre en fonction de la hauteur totale et du diamètre à 1,30 m. A partir de ces tables, il est possible de calculer les exportations et les prélèvements suivant l'âge et la fertilité. HEILMAN et GESSEL dans un peuplement de Douglas ont calculé les réserves d'azote du sol et du peuplement, ainsi que les retours par la litière. SCHWITZER et *al.*, ont fourni également des chiffres très précis pour *Pinus Elliottii.*

En Europe, divers auteurs ont également essayé de chiffrer les prélèvements et les exportations de quelques peuplements : citons MAYER-KRAPOLL pour l'épicéa, FRISON pour le peuplier I 214. REMEZOV s'est attaqué à une étude très complète du cycle des éléments nutritifs en chênaie ainsi que UTENKOVA pour des peuplements de type chênaie-charmaie, chênaie-pessière, pessière à myrtille.

En France, diverses études portant sur les retours par les litières ont cependant été effectuées. Citons les travaux de RAPP sur le Pin d'Alep et le Chêne vert et le chêne kermès, ceux de GUITTET sur le Pin sylvestre, ceux de TOUTAIN et DUCHAUFOUR sur le Hêtre et ceux de GAGNAIRE sur le Peuplier I 214.

Pour notre part, nous nous sommes limités à un aspect du cycle des éléments, c'est-à-dire au retour des éléments par l'intermédiaire de la litière et des eaux de pluie, dans 4 peuplements où l'un d'entre nous (AUSSENAC, 1969) avait déjà évalué la production de litière. Celle-ci a été estimée à 6 tonnes par hectare et par an pour le Pin sylvestre, à 3 tonnes par ha et par an pour *Abies grandis*, à 2 t/ha/an pour l'Epicéa et à 3,7 t/ha/an pour les feuillus (mélange hêtre - charme).

I. — CARACTÉRISTIQUES DES STATIONS ÉTUDIÉES

L'étude a été réalisée en forêt domaniale d'Amance, à 15 km à l'Est de Nancy. Elle porte sur trois peuplements résineux : Pin sylvestre (*Pinus silvestris*), Epicéa (*Picea abies*), Sapin de Vancouver (*Abies grandis*) et sur un peuplement feuillu mélangé de Hêtre (*Fagus silvatica*) et de Charme (*Carpinus betulus*).

Le tableau 1 donne leurs caractéristiques ainsi qu'une évaluation de la production bois fort au moment de l'étude.

TABLEAU I

Caractéristiques des quatre peuplements étudiés

	Age (en années)	Nombre d'arbres/ ha	Hauteur moyenne (m)	Diamètre moyen (cm) à 1,30 m	Production estimée en 1967 m³/ha/an(1)	Production annuelle de litières (tonnes/ha/an)
Pin Sylvestre *Pinus silvestris* L.	29	1 520	13,0	17,0	6,0	1965-1966 : 6,182 1966-1967 : 5,800
Epicéa *Picea abies* L (Karsten)	24	2 160	12,5	12,0	9,6	1965-1966 : 2,078 1966-1967 : 3,769
Sapin de Vancouver *Abies grandis* Douglas Lindt	33	620	23,0	30,3	12,5	1965-1966 : 3,035 1966-1967 : 2,954
Feuillu *Fagus silvatica* L *Carpinus betulus* L	30	1 300	12,5	8,7	non estimée	1966-1967 : 3,714

(1) Production moyenne par hectare et par an depuis l'origine.

Ces peuplements sont installés sur des sols bruns lessivés marmorisés, développés sur des marnes liasiques recouvertes de limons. Il s'agit de sols compacts bien pourvus en bases mais non calcaires.

Le tableau 2 donne les caractéristiques essentielles du profil.

Au point de vue climatique, rappelons que le climat de cette région est qualifié de semi-continental. La répartition des précipitations est assez régulière dans l'année avec un maximum en juin, juillet, août. Pour la période 1931-1960, la normale des précipitations annuelles est estimée à 712 mm.

TABLEAU 2

Caractéristiques chimiques d'un sol brun lessivé marmorisé
(Forêt domaniale d'Amance)

	C/N	pH	T	S/T	Ca^{++}	K^+	Mg^{++}	P_2O_5 ‰
A_1	16	5,1	10,2	58	4,9	0,87	1,31	0,10
A_2	13	4,9	7,8	48	2,1	0,68	0,97	0,10
B_g	8	5,1	12,0	91,3	8,6	0,50	1,86	0,34

II. — MÉTHODES DE TRAVAIL

2.1. Rappel du dispositif expérimental et des techniques de récolte.

Ce travail a pû être réalisé à partir du dispositif expérimental qui a été installé pour étudier les phénomènes d'interception des précipitations (Aussenac, 1968).

Les récoltes de litière ont été effectuées grâce à un ensemble de 8 à 12 pluviomètres par essence (pluviomètres type « association ») installés à 0,50 m de hauteur au-dessus du sol (pour plus de précision, la moitié des pluviomètres est fixe, l'autre moitié mobile sous le peuplement).

2.2. Méthodes d'analyses et expression des résultats.

La matière organique recueillie périodiquement a été triée en diverses catégories (feuilles, écorces, branches...). Pour l'analyse minérale, nous avons mélangé les divers éléments mois par mois et nous avons finement broyé l'ensemble brindilles, aiguilles, écorces, etc., après passage à l'étuve à 105 °C.

Sur les échantillons de matières organiques de chaque mois ainsi obtenus, nous avons effectué une analyse totale des éléments suivants : N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu et B. Nous n'avons pas effectué la détermination du zinc car les pluviomètres ayant servi à recueillir les échantillons étaient construits avec ce métal. Tous ces éléments, sauf le bore ont été dosés après minéralisation par voie humide à l'aide de H_2SO_4 et H_2O_2.

— N Distillation au micro-Kjeldahl Parnas Wagner,
— P Colorimétrie au molybdate d'ammonium et réduction au chlorure stanneux,
— K et Ca Spectrophotométrie de flamme,
— Mg Colorimétrie au jaune de titane,
— Mn Colorimétrie après oxydation de l'ion Mn^{++} en MnO_4 par le périodate de potassium,
— Fe Colorimétrie au sulfocyanure d'ammonium,
— Cu Colorimétrie après passage sur résine échangeuse d'ions,
— B Colorimétrie à la dianthrimide 1-1′ après minéralisation par voie sèche.

Sur les échantillons d'eau recueillis soit directement, soit après passage à travers la masse foliaire, soit par écoulement le long des troncs, nous avons effectué directement les dosages de P, K, Ca, Mg par les mêmes méthodes que ci-dessus.

L'azote ammoniacal a été dosé directement dans les eaux par la méthode de LUBOCHINSKY ZALTA (colorimétrie par action de ClONa, du phénate de sodium, du phosphate disodique et du nitroprussiate de sodium).

L'azote nitrique a également été dosé par colorimétrie à l'acide phénol-disulfonique.

L'azote total a été dosé, après concentration des eaux, minéralisation à l'acide sulfurique et distillation au micro-kjeldahl Parnas Wagner.

III. — RESTITUTION DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX PAR LA LITIÈRE

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les variations mensuelles de la composition minérale de la litière (ou plus exactement des feuilles ou aiguilles arrivant au sol) ont été étudiées pendant deux ans pour les résineux et un an pour les peuplements feuillus. A partir de ces données, nous avons facilement pu obtenir la variation mensuelle de la quantité d'éléments retournant au sol par la litière et évaluer leur quantité annuelle.

3.1. VARIATIONS ANNUELLES DE LA COMPOSITION MINÉRALE DES DÉBRIS ARRIVANT AU SOL.

3.1.1. *Macroéléments.*

Les graphiques ont été tracés pour 4 éléments : l'azote, le phosphore, le potassium et le calcium (graph. 1, 2, 3, 4).

L'allure des courbes est très semblable pour les trois essences résineuses, Epicéa, *Abies grandis* et Pin sylvestre. La teneur en azote passe nettement par un minimum en Septembre, Octobre et Novembre et par un maximum au printemps. Les variations les plus importantes de la teneur en azote de la litière sont observées chez le pin sylvestre. Le phosphore et le potassium passent également par un minimum en automne et un maximum au printemps. Les courbes ne sont pas très claires pour l'Epicéa et l'*Abies grandis,* alors qu'au contraire, pour le Pin sylvestre les variations sont remarquables. Le potassium présente des variations importantes, mais complexes et peu répétitives d'une année à l'autre. L'explication réside probablement, comme l'ont déjà noté certains auteurs, dans le fait que le potassium des aiguilles est facilement lessivé par les eaux de

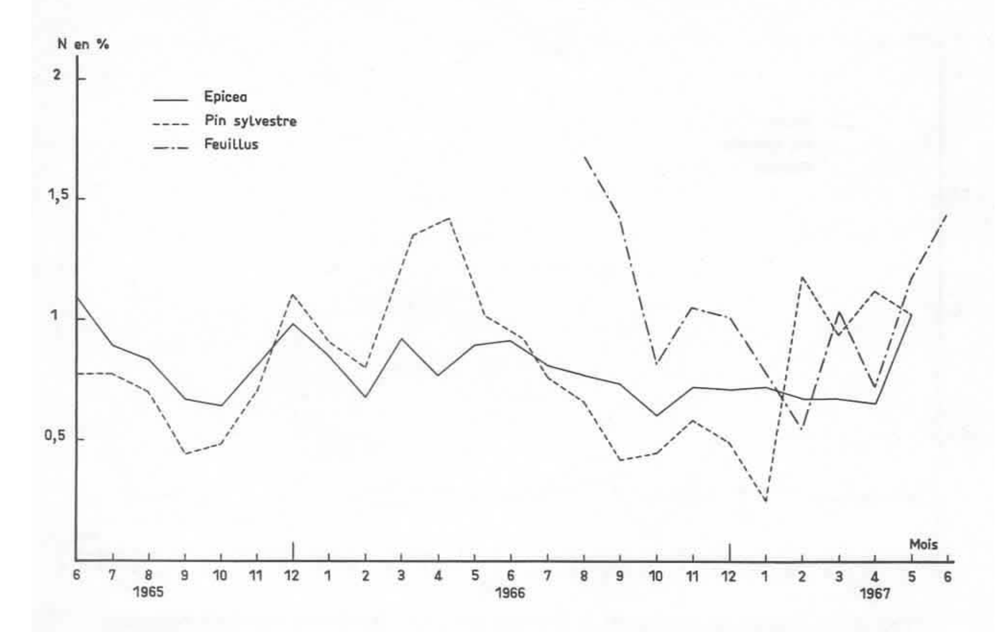


FIG. 1. — Teneur en azote, à diverses périodes, des débris végétaux recueillis sous trois peuplements forestiers.

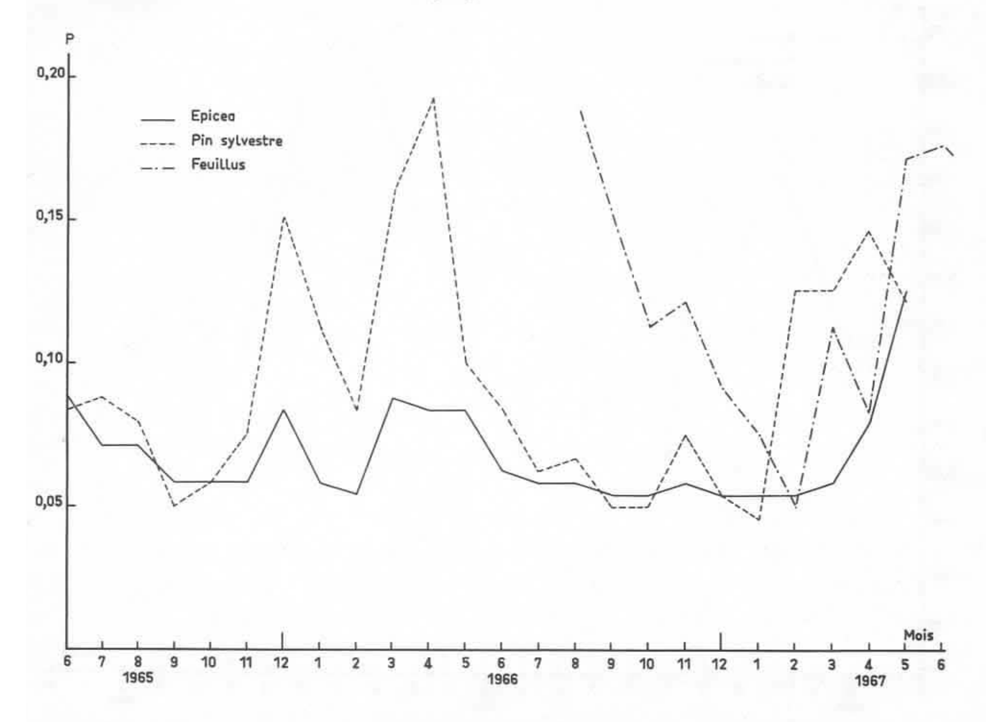


FIG. 2. — Teneur en phosphore, à diverses périodes des débris végétaux recueillis sous trois peuplements forestiers.

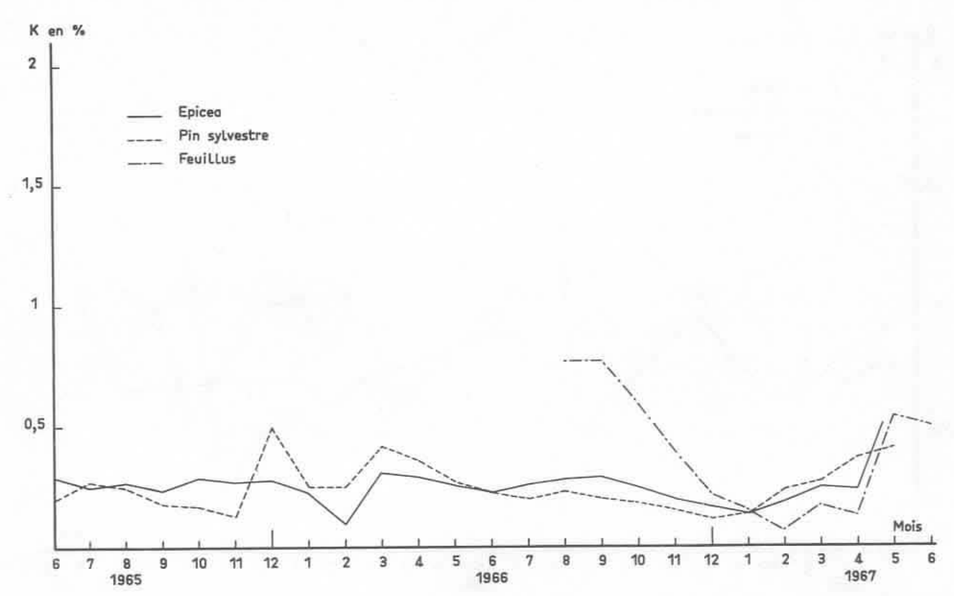


FIG. 3. — Teneur en potassium, à diverses périodes, des débris végétaux recueillis sous trois peuplements forestiers.

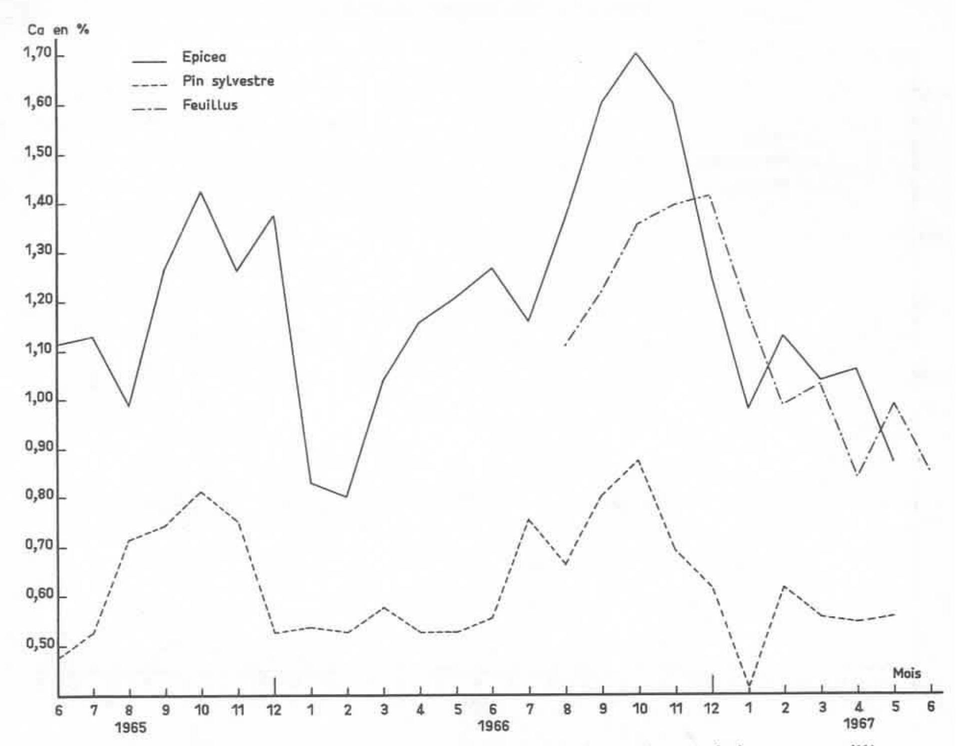


FIG. 4. — Teneur en calcium, à diverses époques, des débris végétaux recueillis sous trois peuplements forestiers.

pluie et que sa concentration dans les aiguilles tombées dépend de l'importance des précipitations avant leur chute ou avant leur collecte.

Toujours pour les trois essences résineuses, nous constatons que le calcium se comporte de manière inverse des trois éléments précédents. La teneur en calcium des débris est maximale en automne (1,45 % pour l'Epicéa, 2,5 % pour l'*Abies grandis* et 0,9 % seulement pour le Pin sylvestre), alors qu'au printemps, elle passe par un minimum.

L'allure des phénomènes est semblable chez les feuillus : minimum en automne pour N (0,8 %), P (0,05 %) et K (0,07 %), maximum au printemps (N : 2,2 %; P : 0,17 %; K : 0,77 %) et inverse pour le calcium. Pour l'azote, il existe néanmoins une légère différence, la teneur en azote de la litière des feuillus ne réaugmente qu'en avril-mai, alors que chez les résineux, dès novembre, la teneur en azote a tendance à augmenter.

Enfin, la teneur en magnésium de la litière présente des variations difficiles à interpréter, quelle que soit l'essence (0,01 à 0,10 %).

3.1.2. *Oligoéléments.*

Les variations mensuelles des 4 oligoéléments dosés sont beaucoup moins interprétables que celles des macroéléments.

Le bore et le manganèse semblent présenter un minimum en hiver (pour l'Epicéa : 0,02 à 0,07 ‰ de Mn, 12 ppm de B) et un maximum en automne (3 ‰ de Mn et 25 ppm de B), alors que le cuivre semble avoir un comportement inverse (minimum de 8 ppm environ en octobre, maximum de 70 ppm en janvier).

Manganèse, bore et calcium présentent donc les mêmes variations mensuelles dans la litière : ce sont les trois seuls éléments dont la concentration augmente en automne, tandis que les autres éléments que nous avons déterminés restent soit plus ou moins constants dans les feuilles ou aiguilles qui tombent, soit, le plus fréquemment, diminuent nettement en automne.

3.2. Comparaison avec les teneurs et les variations des teneurs en éléments minéraux des aiguilles ou feuilles fonctionnelles.

Les feuilles ou aiguilles représentent toujours, au moins pour le pin sylvestre, l'Epicéa et les feuillus, une très forte proportion des débris végétaux qui tombent au sol. Il est normal de comparer leur composition minérale à celle des feuilles et aiguilles fonctionnelles.

Examinons tout d'abord le cas des résineux aux mois d'octobre et novembre, c'est-à-dire à la période de production maximale de litière. La teneur en azote

des débris qui tombent au sol est plus faible que celle des aiguilles de l'année : alors que les débris constituant la litière ont des teneurs presque toujours inférieures à 1 %, les aiguilles fraîches contiennent 1,30 à 1,35 %.

La différence, si elle est nette, n'est cependant pas considérable.

Pour le phosphore et le potassium par contre, les différences sont beaucoup plus importantes. Les débris qui tombent au sol sont véritablement « vidés » de leur potassium et de leur phosphore. Les teneurs en ces deux éléments sont de deux fois à trois fois moins importantes dans la litière que dans les aiguilles fonctionnelles de l'année.

Pour le phosphore, la concentration est du même ordre de grandeur que dans les aiguilles vivantes de 3 ans (0,2 % d'après HOHNE), mais pour le potassium, elle est encore beaucoup plus basse que celle d'aiguilles de 4 ans (0,6 %).

Pour le manganèse et le calcium, c'est l'inverse. Il y a nettement accumulation de ces deux éléments dans les débris arrivant au sol en automne. L'accumulation de calcium est relativement faible chez le Pin sylvestre et beaucoup plus importante chez l'Epicéa et l'*Abies grandis*.

En ce qui concerne les autres oligoéléments, il semble que la teneur en cuivre des débris est très supérieure à la teneur des aiguilles et feuilles vivantes, alors que pour les autres oligoéléments, elle est du même ordre de grandeur.

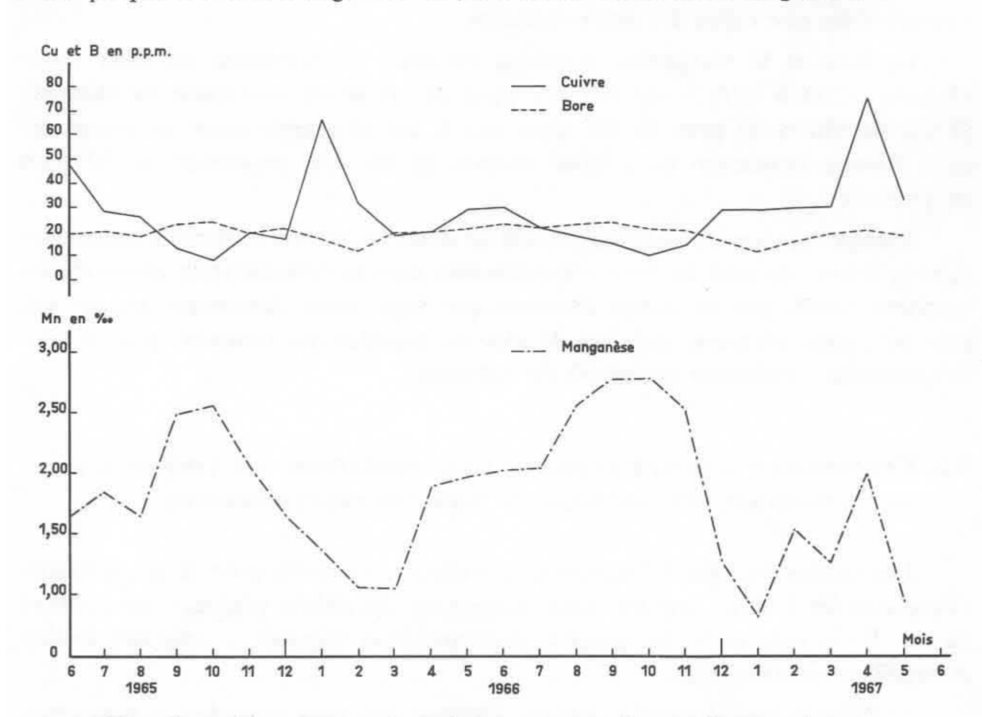


FIG. 5. — Teneur en cuivre, bore et manganèse à diverses époques, des débris végétaux recueillis sur un peuplement d'épicéa.

D'après certains travaux (HOHNE, 1964), on sait que les aiguilles de 1 et 2 ans jouent le rôle d'organes de réserve et libèrent des éléments au profit des jeunes aiguilles au moment de la pousse. Ceci se traduit par des fluctuations régulières de leur composition. Les fluctuations de même ordre, constatées au cours de ce travail pour les aiguilles qui tombent, notamment de septembre à avril, laissent donc supposer que cette fonction de réserve s'exerce pendant toute la durée de leur persistance sur l'arbre, soit jusqu'à un âge de 4 à 5 ans.

A ces variations de source physiologique, s'ajoute au printemps une augmentation de concentration du matériel récolté en N, P et K dûe à la chute de jeunes pousses, bien alimentées, mais fragiles et qui tombent en abondance pendant les grands vents.

Chez les feuillus, le problème est tout autre. Seules les feuilles de l'année arrivent au sol.

Si nous nous référons à une étude effectuée sur le chêne à Amance (LEROY, 1968), nous constatons que la variation de composition de la litière est très semblable à celle des feuilles prélevées sur l'arbre. L'allure des variations est identique, mais en valeur absolue, il semble qu'il y ait certaines différences : les teneurs en azote, potassium et phosphore semblent toujours plus faibles dans les feuilles qui tombent que dans les feuilles en place sur l'arbre, alors que ce serait l'inverse pour le calcium.

3.3. VARIATIONS MENSUELLES DE LA QUANTITÉ D'ÉLÉMENTS MINÉRAUX RETOURNANT AU SOL PAR LA LITIÈRE.

Les variations mensuelles de la quantité d'éléments minéraux retournant au sol par la litière sont consignées dans les tableaux 3, 4, 5 et 6.

Pour l'azote, il existe un cycle caractéristique pour les quatre peuplements étudiés. Le retour maximum se produit en automne avec des décalages suivant les essences. Pour le phosphore et le potassium, le cycle précédent se retrouve, mais de façon moins nette. L'allure de la variation du calcium est très semblable à celle de l'azote. Pour ce dernier élément, le Pin sylvestre présente les retours les plus importants pour presque tous les mois, sauf octobre et novembre, où le peuplement feuillu arrive en tête. Dans le cas du calcium au contraire, les retours les plus importants sont le fait du sapin de Vancouver et des feuillus. Ces observations se retrouveront d'ailleurs dans l'examen des retours annuels.

On observe des variations mensuelles beaucoup plus importantes pour l'azote et le calcium que pour les autres éléments. Par ailleurs, il existe toujours, pour tous les éléments, un maximum secondaire en mai, moins important que celui d'automne, mais cependant net (chute de jeunes pousses fragiles). Finalement, l'allure du cycle du retour des macro-éléments est réglée par l'importance des chutes de litière.

TABLEAU 3

Variations mensuelles de la quantité d'éléments minéraux retournant au sol par la litière chez le Pin sylvestre (en grammes par hectare)

	Mois	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	B	Cu
1965	Juin	6 208	555	1 220	3 072	83	179	358	12	51
	Juillet	1 368	128	378	742	41	56	76	3	19
	Août	2 430	128	675	1 944	35	170	157	7	13
	Septembre	9 184	748	2 583	10 762	115	904	717	49	17
	Octobre	10 132	910	2 533	12 218	298	1 326	715	54	10
	Novembre	7 020	595	1 014	5 928	62	515	476	23	18
	Décembre	2 882	356	1 100	1 166	66	136	112	7	7
1966	Janvier	333	35	75	162	9	11	17	1	2
	Février	400	35	100	212	3	14	10	1	4
	Mars	2 092	223	567	783	27	72	80	4	7
	Avril	2 025	262	450	663	25	63	70	4	10
	Mai	6 232	523	1 391	2 729	67	154	304	10	30
	Total	50 296	4 528	12 086	40 381	831	3 600	3 092	175	188

1966	Juin	2 632	205	517	1 316	2	106	136	4	30
	Juillet	3 072	210	640	2 432	42	122	163	5	14
	Août	7 998	630	2 139	6 231	74	539	446	24	19
	Septembre	7 347	603	2 370	9 599	154	1 055	794	30	15
	Octobre	6 305	492	1 746	8 536	194	912	417	24	12
	Novembre	3 549	356	682	3 185	5	241	246	9	9
	Décembre	4 381	360	762	3 937	6	210	368	9	18
1967	Janvier	878	93	273	663	2	20	98	2	5
	Février	3 657	347	636	1 643	3	90	178	4	14
	Mars	2 356	248	513	1 064	2	82	279	3	11
	Avril	1 188	137	333	495	12	48	141	2	10
	Mai	7 442	750	2 501	3 416	183	354	390	10	30
	Total	50 805	4 431	13 112	42 517	679	3 779	3 656	126	187

TABLEAU 4

Variations mensuelles de la quantité d'éléments minéraux retournés au sol par la litière chez le Sapin de Vancouver (Abies grandis) (en grammes par hectare)

	Mois	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	B	Cu
1965	Juin	1 728	126	504	1 056	72	46	372	3	10
	Juillet	923	65	260	526	6	25	78	2	8
	Août	748	59	198	699	17	34	104	1	8
	Septembre	4 662	506	3 330	4 162	222	211	111	13	11
	Octobre	4 427	350	2 375	5 808	172	379	173	13	7
	Novembre	8 586	690	2 783	10 732	239	572	636	19	14
	Décembre	2 100	152	647	2 433	87	126	87	5	6
1966	Janvier	867	51	238	926	26	56	43	3	5
	Février	1 332	89	423	1 404	72	85	9	3	2
	Mars	2 882	243	1 046	3 315	127	204	153	6	3
	Avril	708	57	222	750	36	58	48	1	3
	Mai	884	56	253	631	33	36	78	1	4
	Total	29 847	2 444	12 279	32 442	1 109	1 832	1 892	70	81
1966	Juin	1 599	113	364	1 586	91	86	169	4	6
	Juillet	720	39	162	589	112	11	22	1	3
	Août	1 332	82	432	1 332	9	1	81	3	4
	Septembre	5 994	256	4 070	17 786	1 184	118	148	25	7
	Octobre	4 847	255	2 358	14 738	524	52	66	17	6
	Novembre	1 778	88	525	4 182	61	6	20	6	2
	Décembre	2 496	135	728	5 538	156	16	26	7	5
1967	Janvier	603	49	211	648	18	2	58	1	1
	Février	2 486	191	836	3 520	396	40	110	7	5
	Mars	1 961	184	722	2 312	74	7	130	7	6
	Avril	841	59	238	1 088	25	3	68	3	5
	Mai	2 940	267	162	2 576	168	17	168	9	8
	Total	27 597	1 718	10 808	55 895	2 818	359	1 066	90	58

TABLEAU 5

Variations mensuelles de la quantité d'éléments minéraux retournant au sol par la litière chez l'Epicéa (Picea Abies) (en grammes par hectare)

	Mois	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	B	Cu
1965	Juin	3 225	229	725	2 800	100	392	75	5	12
	Juillet	1 417	96	325	1 482	65	242	32	3	4
	Août	618	44	162	600	6	94	55	1	2
	Septembre	957	67	264	1 408	66	317	35	3	1
	Octobre	1 260	91	435	2 160	105	435	30	4	1
	Novembre	2 677	162	716	3 392	132	549	69	5	5
	Décembre	1 534	113	364	1 807	117	216	31	3	2
1966	Janvier	735	43	161	588	21	97	24	1	5
	Février	634	41	72	583	14	78	16	1	2
	Mars	1 344	110	372	1 260	72	127	34	2	2
	Avril	1 455	130	435	1 755	135	284	33	3	3
	Mai	3 434	275	819	3 843	284	624	76	6	9
	Total	19 290	1 401	4 850	21 678	1 117	3 455	510	37	48

1966	Juin	3 330	196	690	3 840	240	609	54	7	9
	Juillet	1 111	67	286	1 287	77	226	34	2	2
	Août	1 843	116	532	2 622	247	507	104	4	3
	Septembre	4 557	277	1 421	7 791	931	1 617	132	11	7
	Octobre	5 200	368	1 625	10 985	650	2 145	98	14	7
	Novembre	2 392	158	520	4 134	182	655	57	5	4
	Décembre	1 001	62	187	1 397	44	141	70	2	3
1967	Janvier	322	20	49	346	10	25	81	0	1
	Février	1 784	116	389	2 337	103	316	88	3	6
	Mars	1 174	82	338	1 418	67	173	40	2	4
	Avril	1 233	120	348	1 552	116	290	35	3	11
	Mai	6 832	73	2 856	4 928	336	526	185	10	18
	Total	30 779	1 655	9 241	42 637	3 003	7 230	978	63	75

TABLEAU 6

Variations mensuelles de la quantité d'éléments minéraux retournant au sol par la litière chez les feuillus (hêtre et charme) (grammes/hectare)

	Mois	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	B	Cu
1966	Août	1 316	140	539	784	98	130	45	30	0
	Septembre	4 212	407	2 002	3 198	364	556	125	13	0
	Octobre	16 422	1 880	9 499	22 057	1 610	3 542	386	62	2
	Novembre	19 000	1 945	6 080	21 432	1 064	3 298	608	62	2
	Décembre	484	38	88	572	16	56	7	1	0
1967	Janvier	98	8	15	120	3	8	2	0	0
	Février	259	18	24	350	3	8	5	0	0
	Mars	369	35	51	312	9	18	7	1	0
	Avril	966	91	137	892	32	78	23	3	0
	Mai	5 640	535	1 620	3 000	330	267	174	8	0
	Juin	1 926	164	450	774	108	105	34	3	0
	Juillet	864	68	212	388	44	52	25	2	0
	Total	51 556	5 329	20717	53 879	3 681	8 118	1 441	185	4

Le retour des microéléments présente un maximum en automne, sauf en ce qui concerne le cuivre. Pour le dernier, le maximum se situerait au printemps (mai-juin).

3.4. EVALUATION ANNUELLE DE LA QUANTITÉ DES DIVERS ÉLÉMENTS MINÉRAUX RETOURNANT AU SOL PAR LES LITIÈRES (Epicéa, Pin sylvestre, Sapin de Vancouver et feuillus).

Les résultats sont consignés dans le tableau n° 7 :

TABLEAU 7

Quantité totale d'éléments minéraux retournant annuellement au sol par l'intermédiaire de la litière (en kg/ha/an : pour tous les éléments sauf pour B et Cu qui sont exprimés en grammes par hectare et par an).

		N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	B en g	Cu en g
Juin 65 – Mai 66	Pin sylvestre	50,296	4,510	12,080	40,380	0,381	3,600	3,090	175,60	189,40
Juin 66 – Mai 67	d°	50,805	4,480	13,111	42,510	0,678	3,749	3,657	125,94	184,80
Juin 65 – Mai 66	*Abies grandis*	29,847	2,460	12,261	32,440	1,109	1,830	0,189	69,18	80,15
Juin 66 – Mai 67	d°	27,597	2,715	10,808	55,790	2,818	0,412	0,106	90,35	57,55
Juin 65 – Mai 66	Epicéa	19,288	1,400	4,849	21,678	1,117	3,293	0,509	35,85	48,31
Juin 66 – Mai 67	d°	30,778	2,315	9,241	42,636	3,003	7,229	1,778	64,35	75,95
Août 66 – juillet 67	Feuillus	51,556	5,320	20,717	53,879	3,681	8,119	1,439	185,05	4,00

Dans l'ensemble, ils confirment les résultats obtenus à l'étranger. Le retour par la litière des éléments minéraux est globalement plus important chez les feuillus que chez les résineux, ce qui est logique puisque la totalité de la masse foliaire retourne au sol chez les feuillus à la fin de la saison de végétation.

On notera cependant que les quantités d'éléments retournant au sol dans le peuplement de Pin sylvestre, sont sensiblement équivalentes à celles des feuillus pour l'azote, et à peine inférieures pour le phosphore. Enfin, elles sont très supérieures pour le cuivre.

Chez les résineux, il est très curieux de constater que c'est le Pin sylvestre qui restitue le plus d'azote, de phosphore et de potassium au sol. Ce résultat est dû à la plus grande quantité de matière sèche arrivant au sol sous cette essence (6 tonnes/ha/an contre 3 et 2 pour l'*Abies grandis* et l'Epicéa).

Les résultats des deux années sont concordants pour le pin sylvestre et l'*Abies grandis,* mais on note un retour nettement plus important en 1966-1967 pour l'épicea. Cette différence correspond à une retombée plus importante de matière sèche en 1967 (3,190 t/ha/an contre 1,822 t/ha/an).

Les retours sont faibles pour le potassium chez les trois résineux (5 à 13 kg/ha/an) et très faibles pour le phosphore (2 à 5 kg/ha/an); les retours d'azote et de calcium sont nettement plus importants puisqu'ils varient toujours chez les résineux entre 20 et 50 kg.

IV. — RESTITUTION DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX PAR LA LITIÈRE ET LES PRÉCIPITATIONS CHEZ L'ÉPICEA

Nous avons essayé d'approcher un peu mieux le problème du retour des éléments minéraux chez l'épicéa, qui est l'essence la plus importante des quatre essences étudiées.

Les eaux traversant la masse foliaire et les eaux ruisselant le long du tronc ont été recueillies.

Pour pouvoir effectuer un bilan aussi proche que possible de la réalité, il est indispensable également de déterminer la quantité d'éléments minéraux apportés directement par les eaux de pluie sans passage à travers une masse foliaire. Malheureusement, pour diverses raisons, ces dernières déterminations ne sont pas parfaitement rigoureuses. Tout d'abord, le pluviomètre était situé trop bas et trop près d'une route empierrée par du calcaire. Nous avons donc trouvé un excès de calcium dans les eaux de pluie, excès qui provenait des poussières de calcaire arrachées à la route par des véhicules dont le trafic a de plus brusquement augmenté pendant la période de mesure. Nous ne donnerons donc pas de chiffre concernant le calcium.

D'autre part, la collecte des eaux de pluie arrivant au sol a été postérieure à la collecte des eaux de filtration à travers le feuillage ou d'écoulement le long des troncs. Le bilan que nous présentons dans le tableau n° 8 ne peut donc être qu'approché.

TABLEAU 8

Epicéa : Bilan des éléments minéraux retournant au sol
(en kg par hectare et par an)

	Retour par la litière (1)	Pluvio-lessivage apparent		Filtration + Ecoulement (4) = (2) + (3)	Total des éléments arrivant au sol (5) = (1) + (4)	Apport direct par la pluie (approché) (6)	Pluvio-lessivage réel (approché) (7) = (4) − (6)	Retour annuel (approché) des éléments prélevés dans le sol (8) = (1) + (7)
		Filtration à travers le feuillage (2)	Ecoulement le long des troncs (3)					
Azote nitrique		7,27	0,22	7,49				
Azote organique et ammoniacal		18,48	1,20	19,68				
Azote total	30,77	25,75	1,42	27,17	57,94	20 à 30	0 à 7	30 à 37
P	2,29	0,25	0,02	0,27	2,56	0,04	0,27	2,5
K	9,24	21,37	2,12	23,49	32,73	5 à 10	13 à 18	22 à 27
Ca	42,63	12,25	1,2!	13,46	56,09			
Mg	3,00	3,04	0,27	3,31	6,31	2 à 3	0 à 1	3 à 4

4.1. Apports directs d'éléments minéraux par les eaux de pluie.

Les apports directs annuels d'azote à Amance par les eaux de pluie peuvent être estimés de 20 à 30 kg par hectare. Ces chiffres sont élevés, ce qui est probablement dû à la proximité (15 km) des agglomérations de Nancy (300 000 habitants) et de Pompey-Frouard et à la position d'Amance sous le vent de ces agglomérations. Les valeurs obtenues concordent d'ailleurs avec celles qui sont citées par d'autres auteurs pour les régions très industrielles (Gericke et Kurmies, 1957). Les apports de potassium varient entre 5 et 10 kg par hectare et par an et ceux de magnésium entre 2 et 3 kg. Les apports de phosphore sont beaucoup plus faibles : 0,04 kg/ha/an.

4.2. Essai de bilan général.

Nous possédons trois séries de données :

— la quantité d'éléments arrivant au sol par l'intermédiaire des débris végétaux,

— la quantité d'éléments minéraux arrivant au sol par l'intermédiaire des eaux de filtration à travers le feuillage, ou d'écoulement le long des troncs,

— la quantité d'éléments apportés directement par les eaux de pluie.

Ces dernières données sont, rappelons-le, approchées.

La somme des deux premières séries de données nous fournit la quantité totale d'éléments minéraux arrivant au sol. Ces quantités sont de 58 kg par ha et par an pour l'azote, 2,5 kg pour le phosphore, 35 kg pour le potassium, 56 kg pour le calcium et 6 kg pour le magnésium.

Si nous faisons la soustraction entre quantité totale d'éléments minéraux arrivant au sol et quantité d'éléments apportés directement par les eaux de pluie, nous obtenons en principe la valeur correspondant à la restitution d'éléments absorbés aux dépens du sol.

Ce retour annuel d'éléments absorbés aux dépens du sol est approximativement de 30 à 37 kg d'azote par hectare et par an, de 2,5 kg de phosphore, de 22 à 27 kg de potassium et de 3 à 4 kg de magnésium.

La valeur de ces chiffres est très relative car nous ne savons pas dans quelle mesure une certaine partie de ces éléments peut être réabsorbée immédiatement par les racines et participer à plusieurs cycles dans la même année.

D'autre part, nous sommes dans l'ignorance de la quantité réelle d'éléments minéraux présents dans les eaux de pluie qui participent à l'alimentation de l'arbre.

On peut dire, malgré une certaine imprécision de nos analyses des eaux de pluie vierges, que la majeure partie de l'azote retournant au sol par l'intermédiaire des eaux de filtration ou de ruissellement le long des troncs correspond en réalité à des apports directs par les eaux de pluie. Le retour réel d'azote absorbé à partir du sol correspondrait donc presque exclusivement au retour par la litière. Ceci n'a rien de surprenant puisque les formes d'azote soluble sont minoritaires dans les aiguilles (CLÉMENT, 1971).

Pour le calcium, il en est de même, ainsi que pour le phosphore. La restitution au sol de ces deux éléments se ferait donc essentiellement par l'intermédiaire des débris végétaux. C'est également normal puisque le phosphore est surtout présent dans des combinaisons organiques et le calcium dans des sels insolubles dans la cellule ou à l'intérieur des membranes (pectates).

Seul le potassium absorbé par l'arbre retournerait annuellement au sol en quantité importante par l'intermédiaire des eaux de filtration ou de ruissellement.

CONCLUSIONS

Cette étude apporte des précisions sur le bilan annuel des éléments minéraux dans un peuplement d'épicea sur le lias lorrain (tableau 8).

Les apports directs par les eaux de pluie sont de l'ordre de 20 à 30 kg par ha pour N, 0,04 kg pour P, 5 à 10 kg pour K, 2 à 3 kg pour Mg. Ces

valeurs sont en accord avec celles trouvées dans les publications d'autres chercheurs; l'apport élevé d'azote s'explique par la proximité d'agglomérations urbaines et industrielles.

Les restitutions d'éléments par les débris végétaux sont suivant les années de 19 à 30 kg de N, 1,5 à 2,5 kg de P, 5 à 9 kg de K, 21 à 42 kg de Ca, 1 à 3 kg de Mg. Ces chiffres concordent également avec ceux de la littérature; citons à titre de comparaison ceux trouvés par DIETRICH (1968) pour des peuplements de 66 ans de l'Erzgebirge : 21 à 42 kg de N, 1,3 à 3 kg de P, 5,9 à 11,7 kg de K, 11 à 23 kg de Ca, 0,9 à 1,9 kg de Mg.

Les variations d'une année à l'autre tiennent surtout à des différences dans le poids de litière arrivant au sol.

La composition des eaux de pluvio-lessivage des cimes, déduction faite de la quantité d'éléments apportée par les eaux de pluie, montrent que les feuillages cèdent très peu de Mg et de P (0 à 1 kg/ha/an) peu d'azote (0 à 7 kg), mais beaucoup de K (13 à 18 kg).

Le retour du potassium prélevé par les racines s'effectue donc par lessivage des feuillages par les eaux de pluie, contrairement à ce qui se passe pour les autres éléments. D'autres auteurs (ULRICH et *al.*, 1968) ont déjà noté ce fait.

Dans d'autres peuplements, l'un de pin sylvestre, l'autre d'*Abies grandis,* le troisième de hêtre et charme, le retour d'éléments sous forme de débris végétaux a été déterminé (tableau 7) mais les eaux de filtration des feuillages n'ont pas été dosées.

L'*Abies grandis* fournit des chiffres voisins de ceux de l'épicea. Le peuplement feuillu montre un cycle beaucoup plus actif que ces deux résineux, avec des restitutions annuelles de 50 kg de N, 5,2 kg de P, 20 kg de K, 54 kg de Ca.

Il est très surprenant de constater que le pin sylvestre a un cycle presque aussi actif que les feuillus; les débris végétaux qu'il ramène au sol ont sensiblement la même composition que ceux des deux autres résineux mais la quantité de litière est beaucoup plus grande : 6 t/ha/an contre 3 pour l'*Abies grandis* et 2 pour l'épicea. Il se peut qu'une origine génétique particulière explique cette particularité. On n'en doit pas moins conclure que le pin, en bonne station comme c'est le cas, est capable, malgré sa réputation de frugalité de mettre en circuit chaque année une quantité importante d'éléments.

Des variations cycliques importantes dans la composition minérale des débris végétaux qui tombent au sol ont été mises en évidence : elles incitent à penser que les aiguilles, jusqu'à leur chute, jouent un rôle actif de réserve et de fourniture d'éléments aux jeunes pousses.

Les aiguilles qui tombent sont plus pauvres en azote, phosphore et potassium et plus riches en calcium, manganèse et cuivre que les aiguilles fonctionnelles.

BIBLIOGRAPHIE

AUSSENAC G., 1968. — Interception des précipitations par le couvert forestiers. *Ann. Sci. Forest.*, **25** (3), 135-156.

AUSSENAC G., 1969. — Production de litière dans divers peuplements forestiers de l'Est de la France. *Œcol. Plant.*, **4**, 225-236.

CARLISLE A., BROWN A.H.F., WHITE E.J., 1967. — The nutrient content of tree stem flow and ground flora litter and lichates in a Sessile Oak woodland. *J. Ecol.*, **55** (3), 615-627.

CARLISLE A., BROWN A.H.F., WHITE E.J., 1967. — The nutrient content of rainfall and its role in the forest nutrient cycle. XIV° Congrès I.U.F.R.O. Munich, 145-155.

COLE D.W., BESSEL S.P., BICE S.F., 1969. — Distribution and cycling of nitrogen, phosphorus, potassium and calcium in a second-growth Douglas Fir ecosystem. *University of Maine. Forestry Abstracts*, **2**, 241.

DENAEYER DE SMET S., 1962. — Contribution à l'étude du pluviolessivage du couvert forestier. *Bull. Soc. Roy. Bot. Belgique*, **94**, 285-308.

DENAEYER DE SMET S., 1966. — Bilan annuel des apports d'éléments minéraux par les eaux de précipitation sous couvert forestier dans la forêt mélangée caducifoliée de Blaimont (Virelles-Chimay). *Bull. Soc. Roy. Bot. Belgique*, **99**, 345-375.

DIETRICH H., 1968. — Streufall und Nährstoffgehalt der Streu in einem Fichtenbestand auf einer Kalkdüngungsversuchsfläche. *Tagungsberichte der Deutsche Akademie des Landwirtschaftwissenschaften zu Berlin*, n° 84.

DIETRICH H., 1968. — Untersuchungen zür Nährstoffdynamik eines Fichtenbestandes. I. Mitteilung : Massewerte des Fichtenbestande und Einfluss einer Bestandskalkung. *Arch. Forstwes.*, Bd **17**, n° 4, 391-412.

DOMMERGUES Y., 1963. — Les cycles biogéochimiques des éléments minéraux dans les formations tropicales. *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, n° 87.

DOMMERGUES Y., MANGENOT F., 1970. — Ecologie microbienne du sol. Masson et Cie, 796 pages.

DUCHAUFOUR Ph., 1970. — Précis de Pédologie. Masson et Cie, 482 pages.

FRISON G., 1967. — Asportazioni minerali nel barbatellia di poppo. *Cellulosa e carta*, **XVIII**, n° 12 (déc.), 10-24.

GAGNAIRE, 1967. — Le rythme de croissance du Peuplier I 214. *C. R. Acad. Sciences*, Paris 1967, **265** D (19), 1387-90.

GERICKE S. et KURMIES B., 1957. — Pflanzennährstoffe in den atmosphärischen Niederschlagen. *Phosphorsäure*, **17**, 279.

GUITTET J., 1967. — Composition et évolution de Pin sylvestre en peuplements ouverts sur pelouse xérophile. *Œcol. Plant.*, **2**, 43-62.

HEILMAN P. E., GESSEL S. P., 1963. — Nitrogen requirements and the biological cycling of nitrogen in Douglas-fir stands in relationship to the effects of nitrogen fertilisation.. *Plant and Soil*, **1187**, 386-402.

HOHNE H., 1964. — Untersuchungen über die Jahreszeitlichen Veränderungen des Gewichtes und Elementgehaltes von Fichtennadeln in jüngeren Bestanden des Osterzgebirges. *Archiv. für Forstwesen,* **13** Band, Heft 7.

MILLER R.B., 1963. — Plant nutrients in hard Beech. I. The immobilization of nutrients. II. Seasonal variation in leaf composition. III. The cycle of nutrients. *N.S.I. Sci.,* **6** (3), 365-413.

MARUYAMA, IWATSUBO, TSUTSUMI, 1965. — On the amount of plant nutrients applied to the growth by rainwater in adjacent open plot and forest. *Bull. Kyoto - Univ. for.,* n° 36-25-39.

MAYER-KRAPOLL H., 1964. — Die Düngung im Walde. Auswertung langjähriger Versuche und Erfahrungen. *Thomasphosphatfabriken GmbH,* Düsseldorf.

MINA V.N., 1965. — Leaching of certain substances by precipitation from woody plants and its importance in the biological cycle. *Soviet Soil Science,* n° 6, 609.

RAPP M., 1967. — Production de litière et apport d'éléments minéraux et d'azote dans un bois de Pin d'Alep (P. Halepensis Mill.). *Œcol. Plant.,* **2**, 325-338.

RAPP M., 1968. — Contribution à l'étude du bilan et de la dynamique de la matière organique et des éléments biogènes dans les écosystèmes à chêne vert et à chêne kermès dans le Midi de la France. Thèse Docteur ès-Sciences, Montpellier, 190 p.

RAPP M., 1969. — Production de litière et apport au sol d'éléments minéraux dans deux écosystèmes méditerranéens : la forêt de *Quercus Ilex* et la garrigue de *Quercus coccifera. Œcol. Plant.,* **4**, 377-410.

REMEZOV N.P., 1961. — Decomposition of forest litter and the cycle of elements in an Oakforest. *Pochvovedeniye* (7), 1-12.

RENNIE P.Y., 1966. — A forest sampling procedure for nutrient uptake studies. *Common. For.,* **45** (2), 119-128.

TOUTAIN F., DUCHAUFOUR Ph., 1970. — Etude comparée des bilans biologiques de certains sols de hêtraie. *Ann. Sci. For.,* **27** (1), 39-61.

ULRICH B., 1968. — Importance quantitative et sélective du prélèvement d'éléments nutritifs chez le Bouleau et l'Epicéa. *All. Forstzeitschrift,* **23** (47), 815.

ULRICH B., REEMTSMA J.B., KALAN J., 1968. — Untersuchungen zum Nährstoffhaushalt staunasser Standorte. *Tagungsbericht der deutsche Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin,* n° 84.

UTENKOVA A. P., 1962. — Some date relating to the study of the silvicultural properties of soils of oak forests and spruce forests of the Belovezh virgin forest. *Pochvovedenie* (6), 70-77.

YOUNG H.E., CARPENTER P.N., ALTENBERGER R.A., 1965. — Preliminary tables of some chemical elements in seven tree species in Maine. *Techn. Bull.* n° 20. Maine Agricultural experiment Station University of Maine.